

Le Transistor Bipolaire simplifié

Table des matières

1	Un transistor bipolaire c'est quoi, ça sert à quoi ?.....	1
1.1	Définitions.....	1
1.2	Le transistor bipolaire simplifié :.....	2
2	Documentation.....	2
3	Mise en œuvre.....	2
3.1	État linéaire ou état saturé ?.....	2
4	Les deux montages principaux.....	3
4.1	Le montage émetteur commun en commutation.....	3
4.2	Le montage en collecteur commun.....	4
4.3	Le Darlington.....	4
5	Source de tension régulée, source de courant régulée.....	5
5.1	Source de tension élémentaire.....	5
5.2	Source de tension « améliorée.....	5
5.3	Source de courant élémentaire.....	6
6	Thermique, choix du boîtier, gamme de puissance.....	6
7	Les paramètres utiles dans le choix d'un transistor.....	7
8	Deux applications les plus populaires avec un arduino :Dels (leds) et relais.....	8
8.1	Dels.....	8
8.2	Cas de la commande de bobinage (inductances, moteurs).....	9
9	Simulateurs analogiques.....	10

1 Un transistor bipolaire c'est quoi, ça sert à quoi ?

C'est un composant muni de trois pattes :

La base (b), l'émetteur (e) et le collecteur.

Un transistor sert à amplifier ou à commander. Dans l'électronique embarquée ils servent surtout à commander des courants élevés comme dans des Dels ou des relais.

Il faut bien garder en tête que l'utilisation du transistor en interrupteur représente moins de 5 % des utilisations des transistors. Les 95 % restant étant l'amplification ou la logique haute fréquence. C'est pourquoi en général les manuels virent très vite à l'accumulation de formules assez indigestes.

Dans ce tutoriel on va *essayer* de rester simple.

1.1 Définitions

Le courant de commande (I_b) est injecté dans la patte « base », le courant de puissance (I_c) circule du collecteur vers l'émetteur pour un transistor NPN (sens inverse pour un PNP).

On définit le gain en courant β comme étant le rapport entre le courant de collecteur I_c sur celui de

commande de base I_b

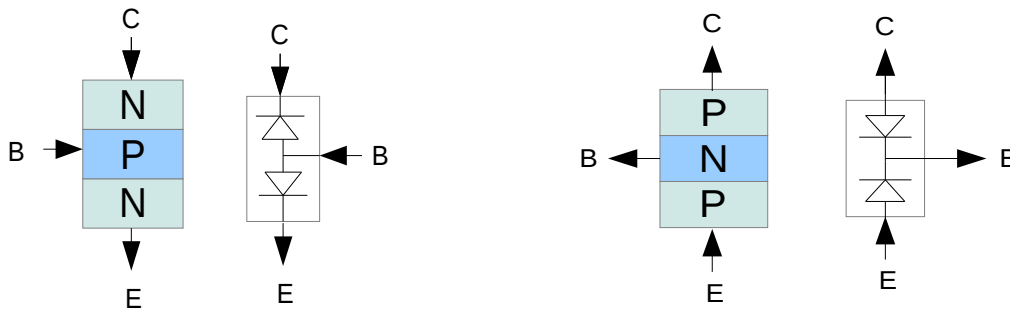
$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

β est de l'ordre de 100 pour un transistor « petits signaux » et peut descendre jusqu'à 20 pour un transistor de puissance.

β est aussi appelé « HFE » en lettres majuscules pour le courant continu, en lettres minuscules « hfe » pour les applications en fréquences élevées.

1.2 Le transistor bipolaire simplifié :

Il existe deux versions NPN et PNP.



Symbolisation du NPN

et

du PNP.

Les zones N et P sont obtenues par dopage. Le dopage consiste à créer localement des alliages avec le silicium afin de créer des atomes qui ont soit un électron excédentaire soit un déficit d'un électron.

Zone N : zone où on a réalisé un surplus d'électrons → elle est chargée négativement

Zone P : zone où on a réalisé un déficit en électrons (on dit qu'on a réalisé des « trous ») → elle est chargée positivement

Que faut-il retenir d'essentiel pour mettre en œuvre un transistor bipolaire:

Dans tous les cas entre la base et l'émetteur on voit une diode polarisée en direct.

Ce qui veut dire qu'en conduction la tension Base/Émetteur doit rester voisine de 0,8V : **il ne faut jamais mettre directement 5V entre la base et l'émetteur mais toujours placer une résistance en série.**

2 Documentation

La documentation de tous les composants « sérieux », c'est dire en dehors des composants exotiques chinois, se trouve dans des feuilles techniques souvent appelées de leur nom en anglais : « Datasheet ».

Un des meilleurs sites pour se les procurer est : <http://www.datasheetcatalog.com/>

Il est illusoire de croire qu'on peut mettre en œuvre un composant sans lire sa « datasheet » au préalable.

3 Mise en œuvre.

3.1 État linéaire ou état saturé ?

L'état linéaire est le fonctionnement normal en amplification.

L'état saturé est utilisé quand on se limite à utiliser le transistor en interrupteur.

La jonction base/collecteur est polarisée en inverse tant que le transistor n'est pas saturé, quand le transistor entre en saturation elle devient passante.

Règle : Dès que la tension de base devient supérieure à la tension de collecteur le transistor est considéré comme saturé.

Quand un transistor est saturé la tension V_{ce} (collecteur/émetteur) est très faible, en général $< 0,3V$. Cette propriété est intéressante quand on cherche à conserver le maximum de tension disponible. Par exemple pour commander des relais.

L'inconvénient, car rien n'est parfait, est que la saturation ralentit la fermeture du transistor, c'est compréhensible : on le « gave » avec des électrons dont il n'a pas besoin. Donc avant de se couper il lui faut évacuer les électrons excédentaires. Tant qu'on reste dans le domaine de fréquences inférieures à 1MHz, et c'est notre cas, c'est supportable. Il faut noter que c'est la principale source de limitation en fréquence de la logique TTL.

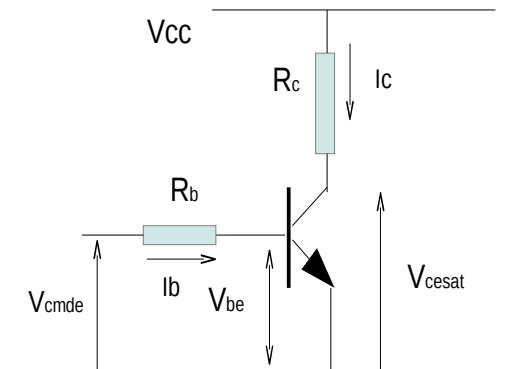
NPN ou PNP ?

Les premiers conçus étaient des PNP, la structure NPN présente de meilleures performances et s'est généralisée. Les PNP ne sont plus utilisés que dans des applications très particulières.

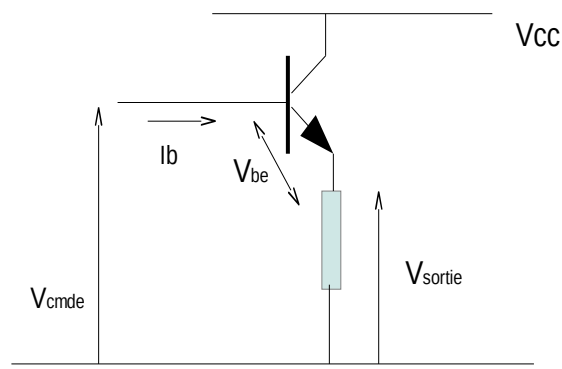
4 Les deux montages principaux

En fait il existe 3 montages : *émetteur commun*, *collecteur commun* et *base commune*,

On ne traitera pas de la base commune qui n'est utilisée que dans quelques amplificateurs de fréquences élevées.



Montage en Emetteur commun



Montage en Collecteur commun

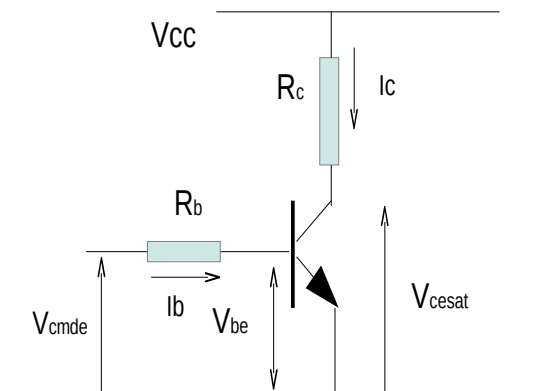
4.1 Le montage émetteur commun en commutation

Le paramètre V_{cesat} se trouve dans la documentation technique du modèle du transistor utilisé.

Calcul :

Le projet impose I_c , le choix du transistor donne β et V_{cesat} .

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{cesat}}{I_c} \quad \text{et} \quad I_b = \frac{I_c}{\beta}$$



Comme on peut le voir dans la feuille de donnée du transistor β varie énormément d'un lot de fabrication à un autre. Voir $100 \leq \beta \leq 300$ est chose courante. On se sort d'affaire en prenant des marges. Dans le cas du montage en émetteur commun saturé on prend $\beta_{forcé} = \beta / 10$.

Maintenant qu'on connaît le courant dans la base $I_b = \frac{I_c}{\beta_{forcé}}$ on peut calculer la résistance de base en se rappelant que entre la base et l'émetteur le transistor est équivalent à une diode et donc son V_{be} est voisin de 0,8V.

$$R_b = \frac{V_{cc} - V_{be}}{I_b}$$

4.2 Le montage en collecteur commun.

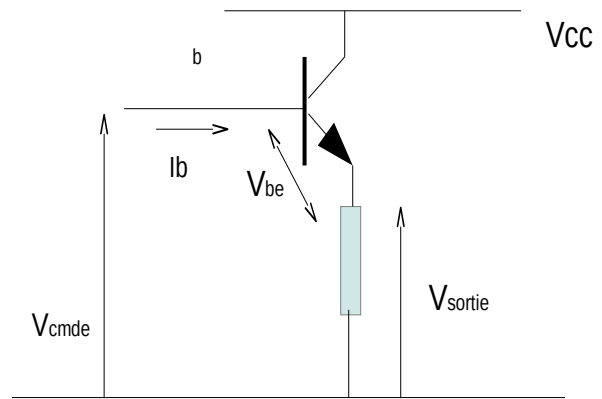
Ce montage est souvent appelé « suiveur ».

Ce montage n'apporte aucune amplification en tension il n'est qu'un amplificateur de courant

On a comme toujours : $\beta = \frac{I_c}{I_b}$

La tension de sortie suit la tension de commande avec un décalage d'un V_{be} .

Ce montage à aussi une autre particularité il présente une forte impédance d'entrée et une faible impédance de sortie.



L'impédance est déterminée par $Z = \frac{V}{I}$

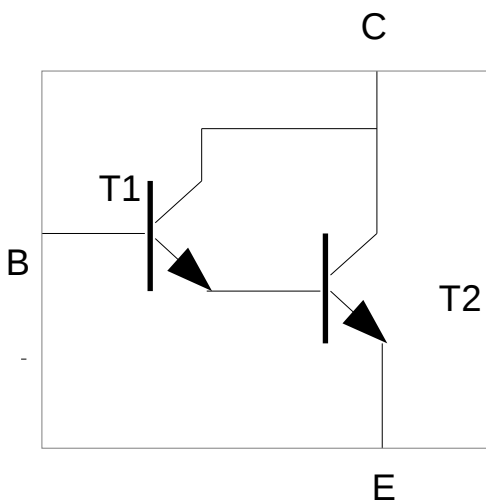
Coté entrée $Z = R \cdot \beta$

Coté sortie $Z = \frac{R}{\beta}$

Point très important : dans ce montage le transistor n'est jamais saturé. Il faut donc surveiller la puissance dissipée $P = V_{ce} \cdot I$ et choisir un transistor dans un boîtier adapté.

4.3 Le Darlington

Tant que le courant I_c reste inférieur à 80 ou 100mA il est possible d'utiliser des transistors dit « petits signaux » mais au-delà il faut passer à des transistors de puissance qui ont le très gros défaut d'avoir peu de gain. Parfois il faut passer par un étage d'amplification. Le plus utilisé est le montage Darlington, on trouve même des montages tout intégré dans les mêmes boîtiers que les transistors de puissance.



T1 est un transistor « petits signaux »

grand gain en courant

$I_{cmax} < 100 \text{ mA}$

T2 est un transistor de puissance :

petit gain en courant

$I_c > 1 \text{ A}$

On voit que $I_{bT2} = I_{eT1}$.

On a vu dans la première figure que :

$I_{eT1} = I_{bT1} (\beta_{T1} + 1)$

Donc $I_{cT2} = \beta_{T2} (\beta_{T1} + 1) I_{bT1}$.

β équivalent du montage darlington :

$\beta \text{ équivalent} = (\beta_{T1} + 1) * \beta_{T2}$

Soit en pratique $\beta = 20 * (100 + 1) = 200$

Remarque importante :

Avec un montage darlington entre la base et l'émetteur on ne voit plus une diode mais deux en série.

Pour la tension $V_{be_darlington}$ il faut donc maintenant tabler sur 1,6 V à 2V et non plus sur 0,8 V.

Ne pas oublier de bien consulter la datasheet avant de mettre en œuvre.

Le montage Darlington peut être utilisé indifféremment en émetteur commun ou en collecteur commun.

5 Source de tension régulée, source de courant régulée.

Ce sont deux objets qui sont très utiles. En règle générale nous raisonnons beaucoup plus facilement avec des tensions qu'avec des courants mais vraiment cela vaut la peine de faire un effort.

Définitions :

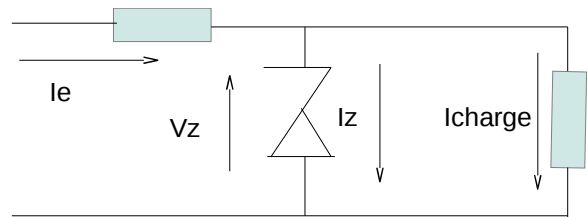
- Une source de tension délivre une tension indépendamment du courant fourni
- Une source de courant délivre un courant indépendamment de la tension fournie

Bien évidemment dans chaque cas la loi d'Ohm doit être respectée : pour la source de tension c'est simple il suffit qu'elle supporte le courant maximal demandé, pour la source de courant la loi d'Ohm s'appliquant à la charge il faut qu'elle soit capable de fonctionner avec une tension $U = R_{\text{charge}} * I$.

5.1 Source de tension élémentaire

Ce montage ne fonctionne que si le courant dans la charge ne varie pas dans de grandes proportions.

C'est la diode zéner qui fait office de réservoir variable.



Principe : dans une diode zéner la tension est « quasi » indépendante du courant.

Puisque V_z est constant :

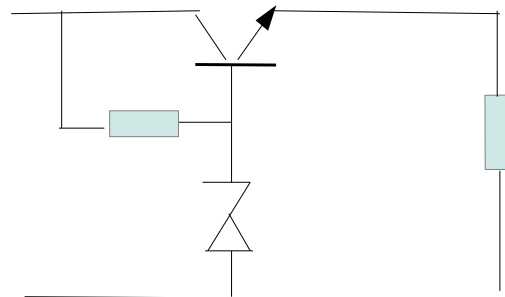
- Pour $I_{\text{charge min}}$ le courant sera maximal dans la zéner.
- Pour $I_{\text{charge max}}$ le courant sera minimal dans la zéner.

Attention une diode zéner est limitée en puissance dissipée ($P = V_z * I_z$). Donc elle ne pourra pas accepter des variations de 50 mA !

5.2 Source de tension « améliorée »

Le transistor, qui est en montage collecteur commun « soulage » la zéner.

Les variations de courant dans cette dernière sont limitées aux variations consécutives à la variation de la tension d'entrée.



Le montage accepte de grands écarts de courant dans la charge.

C'est « en gros » le montage utilisé dans les régulateurs de tension.

Bien sûr les circuits réels sont beaucoup plus complexes et font usage de référence de tension beaucoup plus précises que les diodes zéner et utilisent des amplificateurs opérationnels.

5.3 Source de courant élémentaire

Dans ce montage le courant dans le collecteur du transistor ne dépend pas de la tension d'alimentation mais de la tension de commande.

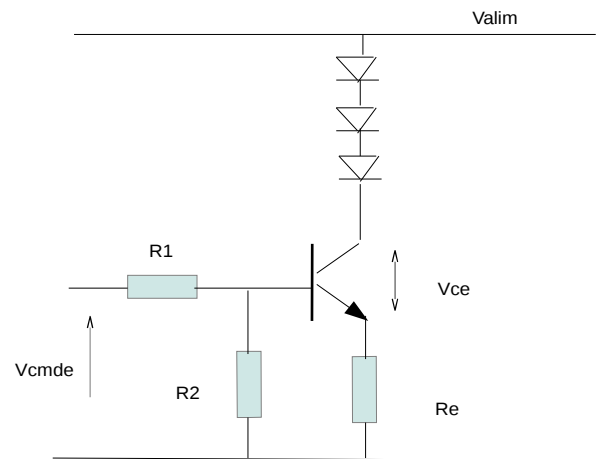
Principe :

On fixe la tension de la base $V_b = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cmde}$

D'un autre côté on a $V_b = V_{be} + R_e \cdot I$.

Comme V_{be} est une constante on peut calculer le

courant d'émetteur $I = \frac{V_b - V_{be}}{R_e}$



Le courant d'émetteur est égal au courant de collecteur plus le courant de base. Comme β est en général supérieur à 100 on peut négliger le courant de base et $I_c \approx I_e$

Ce montage est généralement satisfaisant mais il présente un inconvénient : la tension V_{be} est légèrement variable avec la température. Pour les cas où l'on a besoin de grande stabilité et précision il existe une variante utilisant un amplificateur opérationnel.

Comme dans le montage à collecteur commun le transistor est utilisé en fonctionnement linéaire. Si on le sature la fonction régulation de courant disparaît.

Quand la tension d'alim varie ou que dans l'exemple précédent on supprime ou ajoute des diodes l'ajustement se fait sur la valeur du V_{ce} puisque la tension de l'émetteur est imposée par V_{cmde} .

Conséquence : bien vérifier que le transistor supporte la puissance $V_{ce} \cdot I$.

Pour s'affranchir des variations de β on utilise un principe proche de celui adopté avec le transistor saturé. On fixe le courant qui passe dans le pont R_1/R_2 à 10 fois la valeur du courant I_b moyen.

6 Thermique, choix du boîtier, gamme de puissance.

Il existe plusieurs types de boîtiers.

- 1) Boîtier avec des pattes comme le TO92, ou CMS comme le SOT23 (CMS = Composant Monté en Surface, en anglais SMD pour Surface Mounting Device).
- 2) Boîtier pour transistor de puissance genre TO220. Dans le domaine de l'électronique embarquée c'est le point qui nous intéressera le plus.

La chaleur provient de l'effet Joule et est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

La formule à connaître : $P = RI^2$ ou sous ses autres formes $P = UI$ ou $P = U^2/R$

Les transistors sont fabriqués sur du silicium. La température du silicium ne doit pas dépasser 180°C , au-delà il fond. Cette valeur de 180°C est théorique, les fabricants adaptent cette valeur à chaque modèle de transistor, on la trouve sous l'information de « température de jonction » (ou Junction Temperature).

La puissance dissipée dans un transistor est localisée dans la zone émetteur/collecteur.

$P = V_{ce} \cdot I_c$.

Par analogie avec la tension et le courant on définit une résistance thermique (R_{th}) qui s'exprime en $^\circ\text{C}/\text{W}$.

$\Delta T = P \cdot R_{th}$

Exemple si $P = 2,6\text{W}$ et $R_{th} = 50$ degrés par watt on aura une élévation de température égale à :

$\Delta T = 2,6 \cdot 50 = 130$ degrés.

Pour avoir la vraie valeur de la température de jonction il faut ajouter la température ambiante.
Si $T_{\text{ambiante}} = +25^{\circ}\text{C}$, la jonction sera à $+150^{\circ}\text{C}$, il fonctionnera sans risque.

Par contre si le transistor est dans une boîte noire placée en plein soleil il baignera dans une température ambiante de 60 ou 70°C et dans ce cas T_{jonction} sera égale à $+190^{\circ}\text{C}$ et la jonction fondra.

Les fabricants définissent plusieurs R_{th} :

$R_{\text{th jonction/ambiant}}$ → s'utilise en absence de radiateur

$R_{\text{th jonction/case}}$ → s'utilise quand on ajoute un radiateur sur le boîtier, dans ce cas pour faire le calcul la R_{th} équivalente est égale à la $R_{\text{th jonction/case}}$ + la R_{th} du radiateur.

Quelques valeurs pour les boîtiers les plus courants pour fixer les esprits :

	TO92	Dpack (cms)	TO220
$R_{\text{th jonction/case}}$	NC	8°C/W	3°C/W
$R_{\text{th jonction/ambiant}}$	400°C/W	100°C/W	50°C/W

7 Les paramètres utiles dans le choix d'un transistor.

Premier réflexe à avoir : consulter la feuille de donnée du constructeur (en anglais la datasheet)

Bien distinguer les valeurs des « **ABSOLUTE MAXIMUM RATING** » des valeurs en utilisation normale et permanente.

Les AMR sont des valeurs à ne jamais dépasser, en aucun cas elles ne garantissent une utilisation permanente.

Dans les valeurs en utilisation « normale » les plus utiles sont :

- Le gain en courant (appelé Beta ou HFE), bien vérifier les valeurs min et max et pas seulement la valeur typique.
- La tension V_{ceo} → définit la tension max de fonctionnement pour éviter le claquage.
- La tension $V_{\text{ce sat}}$ → définit le résidu de tension V_{ce} quand le transistor est saturé.
- Le courant max admissible → $I_{\text{c max}}$.
- La puissance et le type de boîtier.

8 Deux applications les plus populaires avec un arduino :Dels (leds) et relais

8.1 Dels

Une Del est une diode électroluminescente (en anglais Led light emitting diode)

Sa consommation est d'environ 20mA, o n'est pas obligé d'utiliser un transistor pour la commander puisqu'un micro-contrôleur atmel peut délivrer jusqu'à 20mA mais le calcul est à connaître.

Schéma :

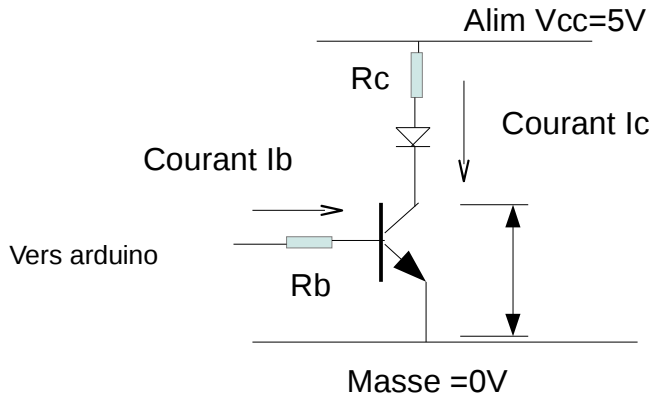


fig 6

Données dont on dispose (données du constructeur):

Courant dans la diode : 20mA

Tension aux bornes de la diode = 1,8 V.

Vcesat du transistor = 0,5V

Gain en courant du transistor B= 80.

Tension de commande qu'envoi l'arduino V=5V

Calculs :

Calcul de Rc :

On applique la loi d'ohm $U=RI$. La tension aux bornes de Rc est égale à l'alimentation Vcc diminuée de la tension aux bornes de la diode et du Vcesat du transistor.

$$V_{rc} = 5 - (1,8 + 0,5) = 2,7 \text{ V}$$

$$R_c = U/I = 2,7/0,02 = 135 \text{ ohms} \rightarrow \text{on prendra la valeur normalisée la plus proche.}$$

Calcul de Ib :

$$I_c = 20\text{mA}, \text{ comme } \beta = 80 \text{ } I_b = 20\text{mA}/80 = 0,25 \text{ mA.}$$

Nous travaillons en commutation, pour être certain de bien saturer le transistor et d'avoir Vcesat=0,5V on prend un courant Ib 10 fois supérieur ce qui fait Ib=2,5 mA.

Calcul de Rb :

Le calcul est quasiment identique que pour Rc.

On a vu que la tension Vbe était voisine de 0,8V, la tension aux bornes de Rc est donc égale à :

$$V_{\text{arduino}} - V_{be}$$

$$\text{Soit } 5\text{V} - 0,8\text{V} = 4,2\text{V}$$

$$\text{Donc } R_b = V_{rb}/I_b = 4,2/0,0025 = 1680 \text{ ohms} \rightarrow \text{on prendra la valeur normalisée la plus proche.}$$

8.2 Cas de la commande de bobinage (inductances, moteurs).

Attention chapitre très important

Loi n : 1 dans un condensateur la tension ne PEUT PAS s'établir ou se couper instantanément.

C'est en général bien compris et utilisé quand on se sert d'un condensateur comme réservoir de courant.

Loi n : 2 dans un bobinage **le COURANT ne PEUT PAS s'établir ou se couper instantanément.**

C'est beaucoup plus difficile à admettre.

Pour un bobinage on comprend que le courant démarre doucement, par contre on comprend moins bien ce qui se passe à la rupture du courant : comment le courant fait-il pour continuer et diminuer lentement alors que le transistor est bloqué c'est-à-dire que le circuit est ouvert ?

Tout simplement parce qu'un bobinage est un circuit magnétique.

Le courant électrique crée un champ électrique qui lui-même donne naissance à un champ magnétique.

C'est ce champ magnétique qui permet d'actionner un relais.

Ce champ magnétique stocke de l'énergie dans le bobinage pendant la période de conduction. A la coupure cette énergie sera restituée et servira à créer un courant qui va compenser le courant que ne fournit plus le transistor. Ces phénomènes ont été étudiés par Lentz qui a donné son nom à la loi éponyme.

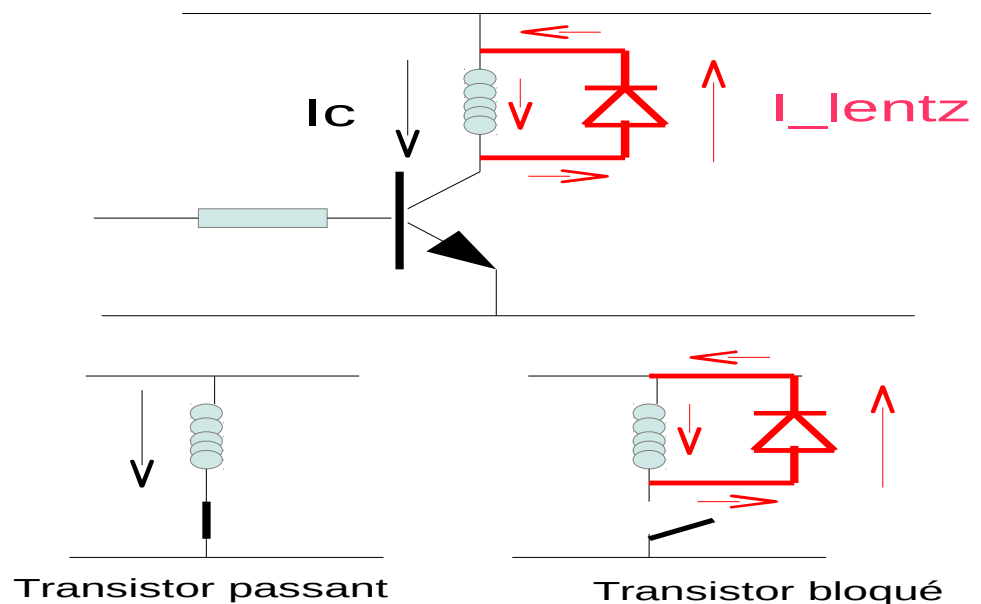
La tension de Lentz répond à la formule : $E = -L \frac{\Delta I}{\Delta T}$

ΔI est la variation du courant et ΔT le temps de la coupure. On voit que le transistor étant un composant rapide la tension **E** peut atteindre plusieurs centaines de Volts, détruisant par là-même le transistor par claquage : il se crée un arc électrique à l'intérieur du silicium de la même manière qu'il s'en produit quand on rapproche deux pointes reliées à une haute tension.

C'est pourquoi il faut toujours placer une diode en inverse en parallèle des bobinages pour court-circuiter cette tension.

Bien entendu le plus près possible du bobinage.

La diode est souvent appelée « diode de roue libre »



Ces précautions indispensables comprises et prises le calcul des résistances est exactement le même que pour le cas précédent.

Linear Technologie met gratuitement un programme pour aider ses clients à utiliser ses circuits convertisseur de tension → PowerCad.

Ce logiciel est didactique et permet de comprendre comment un bobinage peut « stocker » du courant. Je ne peux qu'encourager la consultation des exemples.

9 Simulateurs analogiques.

Ils existe plusieurs logiciels qui permettent de « tester à l'écran » avant de mettre sous tension.

Tous sont basés sur le « moteur » Spice de l'université de Berkeley. Ce moteur est libre parce qu'il a été développé sur des fond fédéraux..

Le « moteur » Spice s'utilise « à la poigne et en ligne de commande ».

Beaucoup d'éditeurs de logiciel ont apportés deux valeurs ajoutées principales :

- une interface graphique plus ou moins ergonomique.
- des modèles de composants.

Sans mystère pour apporter des modèles représentatifs des circuits réels et une interface graphique ergonomique tout en proposant les très nombreuses commandes de Spice il faut aligner les € sur la table. Donc Orcad, Cadence et consort ne sont pas l'amateur.

Pour l'amateur il reste :

Qucs (Win/Linux)

LTSpice (Win)

La suite **gEDA** : Linux c'est sûr, Win je crois que oui et **gSpiceUI** son interface graphique.

NGSpice Win= je pense , Linux = oui. Elle peut s'utiliser soit en ligne de commande soit par l'intermédiaire de gSpiceUI

Mon avis : pour un public de programmeurs la ligne de commande ne doit pas être un repoussoir ou je n'ai rien compris à la programmation.

Ce qui est absolument indispensable c'est d'avoir un éditeur de schéma en mode graphique, par expérience je peux dire que décrire un schéma dans un fichier texte en nommant les nœud c'est infernal.

En dehors des intégrés total que sont Qucs et Ltspice il existe plusieurs éditeurs de schéma :

- Kicad qui peut exporter une description topologique compatible Spice mais il faut terminer le fichier à la main pour qu'il soit exploitable par Spice. A suivre le logiciel évolue.
- gSchem de la suite gEDA qui exporte un fichier directement exploitable.

Et sans doute d'autres que je ne connais pas.